

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.019

冲击电弧作用下 C_4F_7N/CO_2 气体灭弧性能仿真分析

吴东, 陈文贵

(广西高校先进制造与自动化技术重点实验室(桂林理工大学), 广西 桂林 541006)

摘要: C_4F_7N/CO_2 混合气体是目前最有潜力替代 SF_6 的气体之一。为了探讨 C_4F_7N/CO_2 混合气体的灭弧能力, 文中根据电弧能量平衡理论, 建立电弧能量平衡方程组, 获取管道内部超压随时间的变化规律。同时, 基于磁流体动力学模型, 使用 COMSOL Multiphysics 软件建立压爆气流防雷间隙灭弧结构的二维磁流体模型, 在雷电流幅值为 4 kA 的条件下, 对管道内不同比例 C_4F_7N/CO_2 混合气体在冲击电弧作用下的熄弧特性进行仿真分析。基于上述方法, 结合电弧能量平衡理论, 分析模型中电导率、速度以及压强的变化规律。与理论结果对比分析得出: 同一工况条件下, 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$ 的灭弧性能较优, 其次为 10% $C_4F_7N/90\%CO_2$ 与 5% $C_4F_7N/95\%CO_2$, 并且熄弧时间符合气吹灭弧的要求。

关键词: C_4F_7N/CO_2 混合气体; 灭弧性能; 电弧能量平衡理论; 磁流体动力学模型; 冲击电弧; 熄弧时间

中图分类号: TM85

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)02-0179-10

0 引言

SF_6 具有优秀的灭弧与绝缘性能^[1-4], 但其属于温室效应气体, 会加快全球温室效应, 其全球变暖潜值(global warming potential, GWP) 大约为 CO_2 的 23 900 倍^[5-6]。在《巴黎协定》中, 全球就 21 世纪中叶实现零温室气体排放达成共识^[7]。

为尽可能地减小 SF_6 对环境的影响, 寻找 SF_6 的替代品是当前的研究热点与难点^[8-11]。综合考虑替代气体的绝缘性能、环保性能以及液化温度, 目前环保型 C_4F_7N/CO_2 混合气体是替代 SF_6 的较好方案^[12-16]。但 C_4F_7N/CO_2 混合气体的液化温度为 $-4.7\text{ }^\circ\text{C}$, 因此需要与缓冲气体混合使用。文献^[17]进行了不同缓冲气体在 0.1~0.7 MPa 下的绝缘特性实验, 结果表明, 在相同条件下, C_4F_7N/CO_2 混合气体绝缘性能优于 C_4F_7N/N_2 与 $C_4F_7N/空气$, 并且气压为 0.1 MPa 时 C_4F_7N/CO_2 中 C_4F_7N 所占比例不应超过 20%。文献^[18]对 C_4F_7N 混合气体进行了工频击穿实验, 结果表明, C_4F_7N/CO_2 与 C_4F_7N/N_2 混合气体均存在协同效应, 且 C_4F_7N/CO_2 的协同效应优于 C_4F_7N/N_2 。

混合气体灭弧能力与电弧等离子体的物性参数相关, 因此文献^[19]计算了不同温度(300~30 000 K) 以及不同气压(0.01 MPa、0.1 MPa、0.5 MPa 等) 条件下 C_4F_7N/CO_2 混合气体的物理性质参数, 为混合气体的仿真提供数据支撑。

收稿日期: 2023-09-07; 修回日期: 2023-11-13

基金项目: 广西自然科学基金资助项目(2022GXNSFBA035-613)

文献^[20]研究了 C_4F_7N/CO_2 混合气体在喷口限制吹弧条件下的燃弧特性, 并通过 Mayr 模型对 C_4F_7N/CO_2 的热开断能力进行了定量评估, 实验表明, 在吹弧作用下混合气体的热开断能力达到了 SF_6 的 91%, 具有替代的潜力。文献^[21]测得在板-板电极下, 间隙为 2.5 mm、压力为 800 kPa 时, 15% $C_4F_7N/85\%CO_2$ 混合气体的绝缘强度与纯 SF_6 相近。综上, C_4F_7N/CO_2 混合气体作为绝缘介质有较好的应用场景, 但是关于 C_4F_7N/CO_2 混合气体的灭弧特性研究依然有限^[22-23]。

为了更好地确定混合气体的灭弧性能, 可以通过有限元仿真方式, 建立电弧模型进行研究。文中对压爆气流式管道防雷间隙灭弧结构进行改进, 将灭弧室内气体更换成不同比例的 C_4F_7N 混合气体, 建立磁流体模型进行灭弧仿真并分析灭弧管道内速度、压力、电导率等变化规律, 研究不同比例的 C_4F_7N/CO_2 混合气体对灭弧时间的影响机制, 为混合气体的灭弧性能测试实验提供理论依据。

1 电弧能量平衡理论

雷击发生时, 灭弧管道中产生冲击电弧, 会导致灭弧管道内的气体膨胀而产生能量极强的高速爆炸气流^[24]。同时由于灭弧管道呈圆柱状, 管道内部会产生巨大的压力, 形成冲击波, 在瞬间形成压爆气流, 压爆气流受到管道内部空间限制, 形成类似爆轰的形态。

为便于计算, 假设弧柱通道是理想的弧柱体, 并用柱状扩张模型取代球状来求解冲击波超压。在电弧通道中, 气体运动过程满足流体动力学的一

致性、动量守恒和能量守恒。其中大电流冲击放电电弧产生的超压 $P(t)$ [25] 为:

$$P(t) = K_1 \rho_0 \left(\frac{dr(t)}{dt} \right)^2 \quad (1)$$

式中: K_1 为电弧通道膨胀抵抗系数; ρ_0 为初始气体密度; $r(t)$ 为 t 时刻电弧通道半径。

电弧通道中的能量平衡方程 [26-29] 为:

$$M(t) + W(t) = E(t) \quad (2)$$

式中: $M(t)$ 为 t 时刻通道膨胀的机械做功; $W(t)$ 为 t 时刻电弧等离子体能量; $E(t)$ 为 t 时刻冲击放电的能量。

冲击放电的能量为注入电弧通道的功率的积分:

$$E(t) = \int_0^{t_e} i^2(t) R(t) dt \quad (3)$$

式中: $i(t)$ 为 t 时刻电弧通道的电流; $R(t)$ 为 t 时刻电弧通道的电阻; t_e 为能量注入时间。

在热力学中,电弧等离子体能量可以表示为:

$$W(t) = \frac{P_h(t) A(t) l}{\gamma - 1} \quad (4)$$

式中: $P_h(t)$ 为 t 时刻注入电弧通道的有功功率; $A(t)$ 为 t 时刻电弧通道的横截面积, $A(t) = \pi r^2(t)$; l 为电弧通道的长度; γ 为气体绝热指数,在理想气体条件下等于比热比且为定值。

通道膨胀的机械做功为:

$$M(t) = \int_0^{t_e} p_{in}(t) l \frac{dA(t)}{dt} dt \quad (5)$$

式中: $p_{in}(t)$ 为 t 时刻通道内部的压强。

将式(3)一式(5)代入式(1)得:

$$\frac{P_h(t) A(t) l}{\gamma - 1} + \int_0^{t_e} p_{in}(t) l \frac{dA(t)}{dt} dt = \int_0^{t_e} i^2(t) R(t) dt \quad (6)$$

将式(1)代入式(6)并微分整理可得:

$$r(t) = \frac{i^2(t) R(t) - \frac{2lK_1\rho_0\pi}{\gamma - 1} r'(t) r''(t)}{\left(\frac{2lK_1\rho_0\pi}{\gamma - 1} + 2lK_1\rho_0\pi \right) (r'(t))^2} \quad (7)$$

式(7)为电弧通道半径的计算公式,其参数通常采用电弧的阻抗模型进行求解得到。将电弧通道半径代入式(1)可以估算出管道内超压值,从而与仿真的管道内压强进行对比,分析管道内压强对灭弧效果的影响。

图1为结合能量电弧平衡理论拟合的5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ 混合气体的超压曲线。可见,曲线整体呈现衰减趋势,在 $t = 1 \mu s$ 时超压将近 1.0×10^4 kPa,随后曲线缓慢衰减。

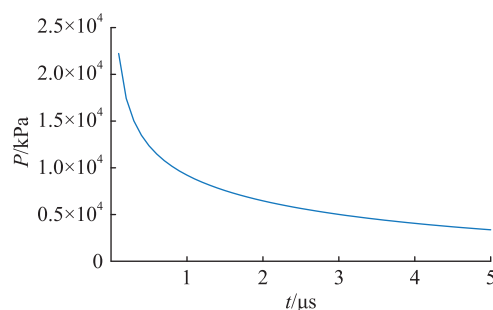


图1 理论拟合的5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ 超压衰减曲线

Fig.1 Theoretical fitted 5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ overpressure decay curve

由图1可知,理论拟合的曲线与5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ 混合气体仿真得到的超压峰值相接近,但仿真灭弧管道内部超压存在滞后性,会导致灭弧管道超压未在极短时间内到达峰值。原因是电弧能量平衡理论仅适用于电弧通道起始发展过程,后续电弧膨胀进行补充的能量不能追及波阵面继续进行能量补充,后续发展也与拟合曲线不同。文中以电弧能量平衡理论为基础,分析电弧熄灭过程,建立灭弧管道的二维磁流体模型,并在灭弧仿真分析中利用电弧能量平衡理论对仿真结果进行解释说明。

2 灭弧管道的二维仿真

图2为压爆气流管道式防雷间隙结构。由于多个灭弧管道存在对称性,可选取其中一个管道建立模型,施加雷电流脉冲,模拟雷电流的产生过程,仿真分析电弧的熄灭过程。

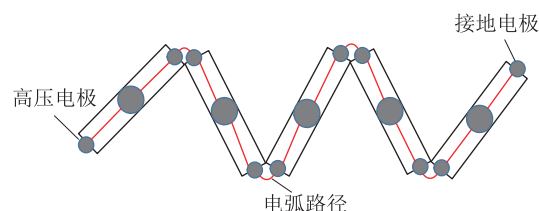


图2 压爆气流管道式防雷间隙内部结构

Fig.2 Internal structure of pressure explosion airflow duct lightning protection gap

在多物理场仿真软件 COMSOL Multiphysics 中采用电磁场、流体传热等模块建立不同比例 C_4F_7N/CO_2 混合气体的二维磁流体模型。图3为灭弧管道二维模型。图3中,左侧与右侧电极材质为铜,左侧铜电极半径为2 mm,右侧铜电极半径为1 mm,灭弧管道长度为6 mm,外壁和内壁采用绝缘材料,灭弧管道内气体为不同比例 C_4F_7N/CO_2 混合气体。文中仿真主要对比 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$ 、10% $C_4F_7N/90\%CO_2$ 、5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ 混合气体的灭弧效果,文中所需气体物性参数均取自等离子数据库 [30]。

设置半圆弧 ab 为高压电极;半圆弧 de 为接地电极;
 ac 、 bf 为绝缘边界; cd 、 ef 为出口;左侧为入口。

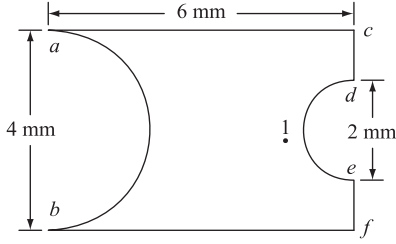


图3 灭弧管道的二维仿真模型

Fig.3 Two-dimensional model of the arc-quenching chamber

仿真区域的初始温度为 293.15 K (未起弧时正常环境温度),定义灭弧管道内初始压强为标压,管道内初始速度为 0。同时采用软件自带的网格划分,选择自由三角形网格划分,设置模型网格的单元大小为超细化,并选用流体动力学进行校准。仿真时间步长选为 1 μ s,仿真时间为 100 μ s,同时设置观测点 1,以便于实时检测其参数动态变化规律。

根据以往的 10 kV 线路避雷器冲击耦合工频遮断电弧实验得到,冲击电流波形幅值为 4 kA 时,其能量能够保证电弧起弧,因此文中仿真采用电流幅值为 4 kA 的冲击电流 8/20 μ s 波形,如图 4 所示。

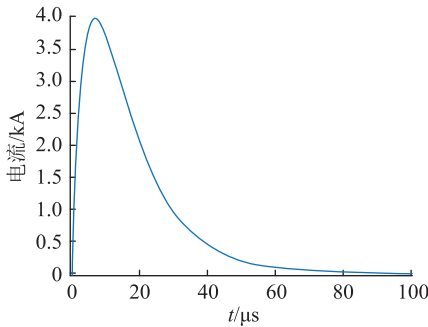


图4 电流幅值为 4 kA 的雷电流脉冲波形
Fig.4 Lightning current pulse waveform with a current amplitude of 4 kA

2.1 模型假设

为描述热等离子体^[31],作出以下假设:(1) 等离子体为热等离子体,处于局部热平衡状态,物性参数为温度的单值函数(热导率、密度等);(2) 灭弧管道内的电弧膨胀会形成冲击波,管道内等离子体是可压缩的层流;(3) 灭弧管道内金属电极的腐蚀忽略不计;(4) 不考虑灭弧管道内混合气体的碳析。

2.2 模型控制方程

根据以上假设,电弧以及四周的气流场处于局部热平衡状态,且遵守质量、能量、动量守恒定律。建立模型方程组如下:

(1) 质量守恒方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (8)$$

式中: ρ 为气体密度; \mathbf{v} 为气体速度矢量。

(2) 动量守恒方程。

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \nabla \cdot \{ -p \mathbf{I} + \mu [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \cdot \mathbf{v})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (10)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (11)$$

式中: p 为压力; \mathbf{I} 为单位矩阵; μ 为流体的动力粘度; \mathbf{J} 为电流密度; \mathbf{B} 为磁通密度; σ 为电导率; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{A} 为磁矢势。

(3) 能量守恒方程。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (12)$$

$$Q = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{5k_B T}{2e} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} - Q_{\text{rad}} \quad (13)$$

$$Q_{\text{rad}} = \nabla \cdot \mathbf{F}_R = 4\pi \varepsilon_N \quad (14)$$

式中: C_p 为常压比热容; T 为温度; k 为热导率; Q 为热源; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电荷; Q_{rad} 为净辐射损失^[32]; \mathbf{F}_R 为辐射同量; ε_N 为净辐射系数。

灭弧管道内气体状态方程式为:

$$p = \rho RT \quad (15)$$

式中: R 为理想气体常数。

3 仿真分析

3.1 温度变化

混合气体对电弧的熄灭能力主要取决于管道内电弧温度小于临界温度时的时间,一般认为电弧的临界温度为 4 000 K。以电弧温度下降到 4 000 K 的时间作为衡量混合气体灭弧能力的指标之一。图 5 为不同气体介质下管道内温度随时间变化的曲线。根据温度判据,当管道内温度小于临界温度时,即可认为电弧失去导电性,已经熄灭。

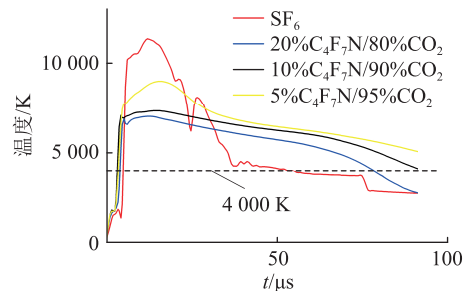


图5 不同气体介质下温度变化曲线
Fig.5 Temperature change curves under different gases

从图 5 可以看出, SF_6 最先达到临界温度 (4 000 K), 其次分别为 20% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/80\% \text{CO}_2$ 、10% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/90\% \text{CO}_2$ 与 5% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/95\% \text{CO}_2$ 。其中 20% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/80\% \text{CO}_2$ 到达临界温度的时间十分接近 SF_6 , 表明 20% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/80\% \text{CO}_2$ 混合气体的灭弧性能接近 SF_6 , 具有替代 SF_6 的潜力。

图 6 为 20% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/80\% \text{CO}_2$ 的温度云图。

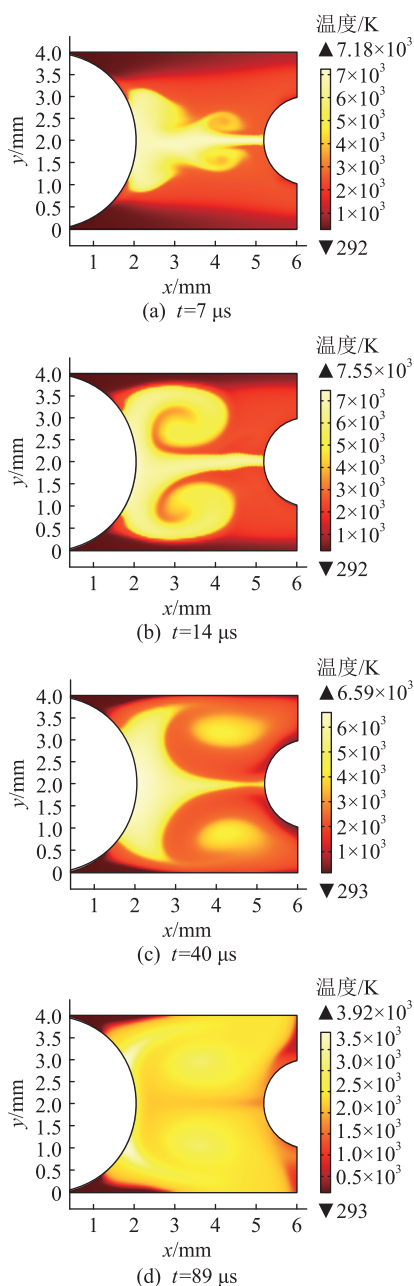


图 6 20% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/80\% \text{CO}_2$ 不同时间下的温度云图

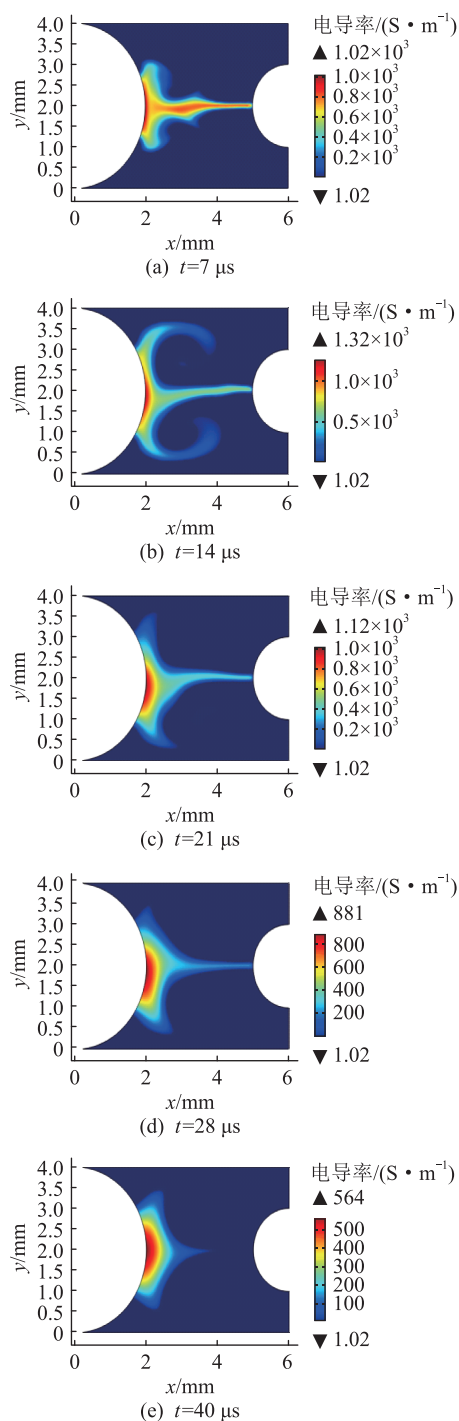
Fig.6 Temperature clouds at different time for 20% $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/80\% \text{CO}_2$

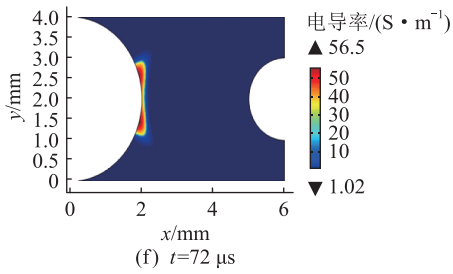
由图 6 可以看出, $t = 7 \mu\text{s}$ 时, 管道内温度达到 7 180 K。此时, 雷电流的能量逐渐转化为等离子体内部能量与电弧通道膨胀的能量。根据电弧能量平衡理论, 电弧的燃烧属于能量不断变化的过程,

包含能量的输入与耗散。随着时间的推移, 电弧温度达到最大值, 由于温差的存在, 管道内的混合气体介质膨胀, 产生了压爆气流。管道内的冲击波能量由电弧通道能量转化而来, 且管道内的超压会影响气流速度变化。随着电弧的能量逐渐转化为冲击波能量, 电弧的温度逐渐下降。当 $t = 89 \mu\text{s}$ 时, 管道内温度小于 4 000 K, 认为电弧熄灭。

3.2 电导率变化

当模型高压电极外加电流幅值为 4 kA 的雷电流时, 管道内电导率开始变化。间隙内电导率发展过程如图 7 所示。



图7 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$ 不同时间下的电导率云图Fig.7 Conductivity clouds at different time for 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$

在电弧形成过程中,击穿间隙产生雷电电弧,并形成流向出口的压爆气流,进行纵向吹弧。吹弧过程中,带电粒子的扩散作用不断加强,同时带电粒子不断向灭弧管道出口方向运动。压爆气流截断了电弧的能量通道,弧柱轴心处的粒子复合运动速度加快,灭弧管道内带电粒子的浓度不断下降,从而导致管道内的电导率下降。

如图7所示,当电极之间通过幅值为4 kA的 $8/20 \mu s$ 的冲击电流时,电弧的能量使管道间隙内的气体介质受热膨胀,形成压爆气流。 $t=7 \mu s$ 时,雷电流参数将近达到峰值,但电导率还未达到峰值,电导率约为 $1020 S/m$; $t=14 \mu s$ 时,电导率达到峰值,约为 $1320 S/m$,此时由于气流吹弧,电弧被压爆气流吹向管道的出口方向,电弧开始被吹散。依据气体放电理论,灭弧管道内产生的压爆气流使弧柱区的电荷发生了转移,游离作用变弱,去游离作用开始增强,空间电荷密度快速下降。如图7(c)–(e)所示,随着压爆气流的持续发展,电弧能量通道已经被压爆气流截断,弧柱通道出现断裂口。 $t=72 \mu s$ 时,电导率已经下降到较低水平,约为 $56.5 S/m$,电弧趋于熄灭。

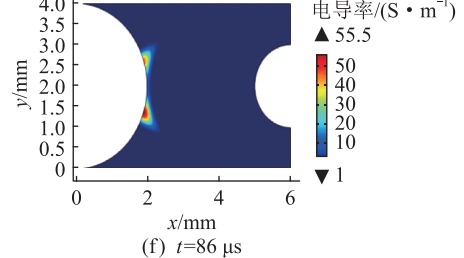
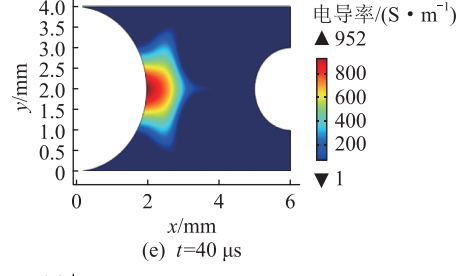
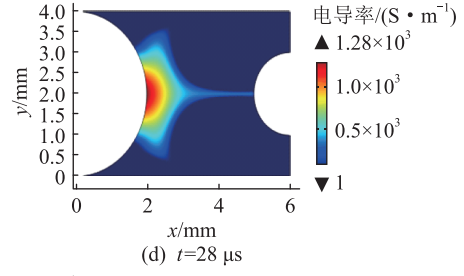
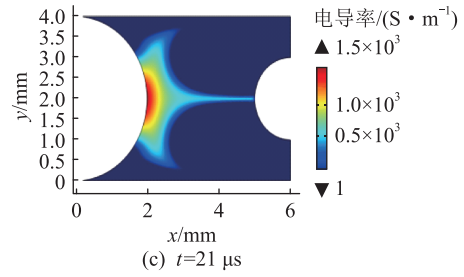
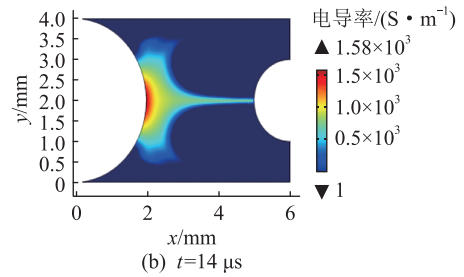
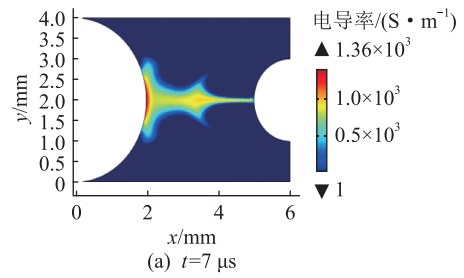
介质为10% $C_4F_7N/90\% CO_2$ 和5% $C_4F_7N/95\% CO_2$ 时灭弧管道的电导率云图如图8、图9所示。

由图8、图9可以看出, $t=40 \mu s$ 时,连续的电弧已经吹散,形成能量断点,管道内电导率已经分别降至 $952 S/m$ 、 $1230 S/m$,相对于20% $C_4F_7N/80\% CO_2$,电导率下降较为缓慢。且20% $C_4F_7N/80\% CO_2$ 混合气体介质下电弧熄灭时间为 $72 \mu s$,小于其余2种比例混合气体的电弧熄灭时间,所以20% $C_4F_7N/80\% CO_2$ 的灭弧效果明显优于其他2种气体。

3.3 速度变化

灭弧管道内速度是确定混合气体灭弧性能的重要参数。图10为不同比例混合气体在观测点1处的 $100 \mu s$ 内速度变化曲线。

可以看出,20% $C_4F_7N/80\% CO_2$ 、10% $C_4F_7N/$

图8 10% $C_4F_7N/90\%CO_2$ 不同时间下的电导率云图Fig.8 Conductivity clouds at different time for 10% $C_4F_7N/90\%CO_2$

90% CO_2 、5% $C_4F_7N/95\% CO_2$ 混合气体介质在管道内形成的速度最大值分别 $1654.16 m/s$ 、 1612.25

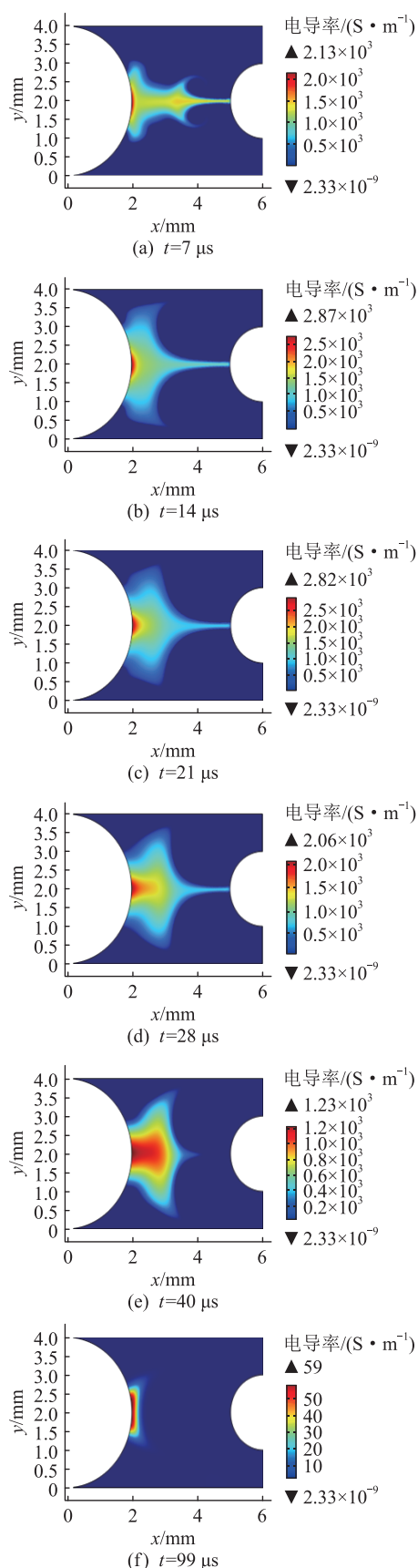


图9 5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ 不同时间下的电导率云图
Fig.9 Conductivity clouds at different time for 5% $C_4F_7N/95\%CO_2$

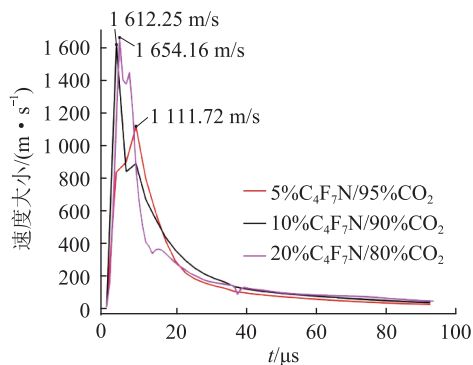


图10 不同比例混合气体在观测点1的气流速度
Fig.10 Airflow velocity for different proportional gas mixtures at observation point 1

m/s、1 111.72 m/s。各比例混合气体在 100 μs 内多次达到峰值,这是因为当管道内气流速度达到峰值后开始下降,压爆气流形成时间很短,气流十分不稳定,导致气流速度出现多次波动。当灭弧管道内气流逐渐稳定后,气流速度呈现上升趋势,达到第二次峰值。在灭弧管道内高峰值气流持续作用于电弧的影响下,电弧被熄灭并且难以重燃。5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ 混合气体介质在灭弧管道中所形成的气流速度峰值在 $t=16 \mu s$ 时大于其他 2 种比例混合气体介质所形成的气流速度,但持续时间与其他 2 种比例混合气体相比较短且后续的气流发展不够稳定、后续波动太大。所以,综合对比得出 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$ 混合气体熄灭电弧的能力优于其他 2 种比例混合气体,更有利于熄灭电弧。

图 11 为 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$ 混合气体在灭弧管道的速度发展云图。

可以看出,在 $t=0 \mu s$ 时,压爆气流产生,此时由于管道封闭,灭弧管道内部发生类似爆炸能量块被冲击电弧触发形成冲击波的过程,引起管道内速度急剧变化,导致灭弧管道内气体流速远大于音速。管道内压强与管道外压强相差极大,使管道内部产生向外的力,混合气体由于力的作用向管道出口方向流动。图 11(a)中气流速度为 1 450 m/s,气流直接作用于电弧,结合图 7 可以看出,电弧电导率开始呈现下降趋势,且由于管道内混合气体介质的温度较高,而外部介质温度低,气流推动着电弧移动。图 11(b)—(d)中,管道内冲击波还未消散,高速气流持续作用在电弧上,从而破坏电弧能量平衡结构。 $t=40 \mu s$ 时,速度下降到 150 m/s,电弧已有部分被吹出。 $t=72 \mu s$ 时,管道内气流速度依然将近 80 m/s,说明气体的高流速会在管道内持续一段时间,气流会不断抑制电弧的能量发展,降低电弧复燃的概率。

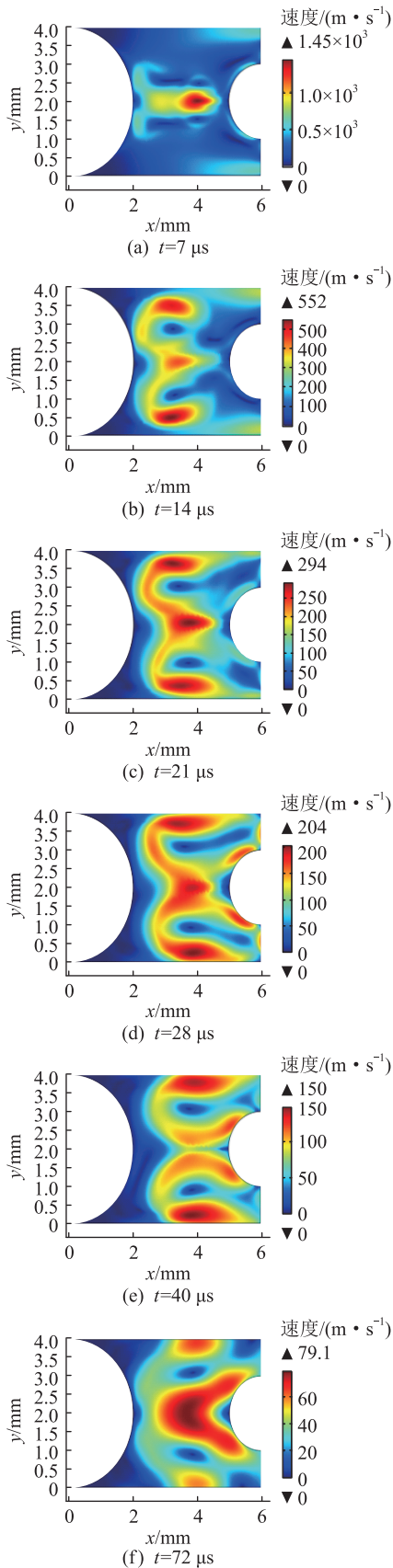


图 11 20% C₄F₇N/80% CO₂不同时间下的气流峰值速度云图

Fig.11 Peak airflow velocity clouds at different time for 20% C₄F₇N/80% CO₂

3.4 压强变化

图 12 为 20% C₄F₇N/80% CO₂、10% C₄F₇N/90% CO₂、5% C₄F₇N/95% CO₂ 在观测点 1 处的压强曲线, 其对应峰值分别约为 2.004 × 10⁴ kPa、1.380 × 10⁴ kPa、1.116 × 10⁴ kPa。

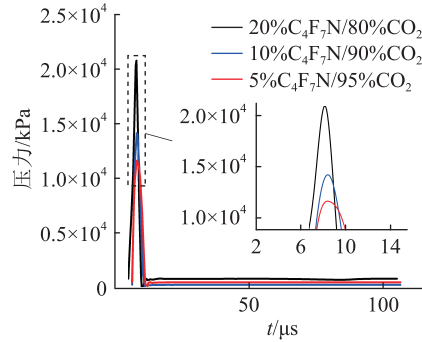


图 12 不同比例混合气体在观测点 1 的压强曲线

Fig.12 Pressure curves for different proportional gas mixtures at observation point 1

以 5% C₄F₇N/95% CO₂ 混合气体在灭弧管道内的压强发展为例, 在 2 个电极之间产生电弧时, 电弧能量开始加热管道内 C₄F₇N/CO₂ 混合气体, 初始压强开始迅速上升。t = 7 μs 时, 压强迅速上升到 1.116 × 10⁴ kPa, 达到峰值, 同时速度也达到峰值, 且在极短时间内压强迅速下降并开始趋向平稳。这说明在这段时间内灭弧管道内部产生了较高的压强, 进而在管道内部形成压爆气流截断电弧, 使电弧熄灭。

由图 12 可见, 20% C₄F₇N/80% CO₂ 混合气体在灭弧管道内产生压强最大, 5% C₄F₇N/95% CO₂ 混合气体在灭弧管道内产生压强最小。气体的压强是由分子无规则的碰撞而产生的, 由于灭弧管道的限制, 运动过程不断加剧, 管道内气体压强增大, 同时由于 20% C₄F₇N/80% CO₂ 混合气体的密度最大, 10% C₄F₇N/90% CO₂ 混合气体密度次之, 5% C₄F₇N/95% CO₂ 混合气体密度最小, 所以 20% C₄F₇N/80% CO₂ 混合气体在管道内的压强明显大于其他比例混合气体。混合气体密度越大, 气体对电弧的向外膨胀抑制作用越强, 同时电弧通道也因此不断减小, 冲击波超压增大引起灭弧管道内速度增大, 使灭弧效果增强。综上所述, 20% C₄F₇N/80% CO₂ 混合气体的灭弧效果最好。

4 结论

文中根据电弧能量平衡理论, 建立电弧能量平衡方程组, 获取管道内部超压随时间的变化规律并以压爆气流管道式防雷间隙为基础建立二维磁流体

模型,判断不同比例 C_4F_7N/CO_2 混合气体的灭弧性能强弱,为 C_4F_7N 混合气体的工程应用提供了参考依据。结论如下:

(1) 文中依据电弧能量平衡理论拟合得到 5% $C_4F_7N/95\% CO_2$ 混合气体在理论下的压强衰减曲线,该曲线与仿真得到的压强在峰值附近的衰减曲线具有一致性。

(2) 在幅值为 4 kA 的雷电冲击电流下,对不同比例混合气体在灭弧管道内产生的电导率、速度、压强进行分析对比,得知 20% $C_4F_7N/80\% CO_2$ 的灭弧性能最优。

(3) 管道内气流速度达到气体灭弧所需要的速度的时间在 1 ms 内,验证了 C_4F_7N/CO_2 混合气体的熄弧有效性。

参考文献:

[1] 姜仁卓,何柏娜,颜雅迪,等. 双能式 SF_6 高压断路器灭弧室结构设计及熄弧特性仿真研究[J]. 高电压技术,2020,46(6):2040-2048.
JIANG Renzhuo, HE Baina, XIE Yadi, et al. Structural design of arc extinguisher for dual-energy SF_6 high voltage circuit breaker and simulation research of its arc-extinguishing characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2040-2048.

[2] 顾琦,仲林林. 基于一维电弧模型的 SF_6 混合气体灭弧性能评价[J]. 电力工程技术,2022,41(6):140-146.
GU Qi, ZHONG Linlin. Evaluation of the interruption capability of SF_6 gas mixtures based on one-dimensional arc model [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6): 140-146.

[3] 尹凯强,陈功,安韵竹,等. 气压和温度对 SF_6 气体绝缘性能的影响研究[J]. 电瓷避雷器,2023(2):71-77.
YIN Kaiqiang, CHEN Gong, AN Yunzhu, et al. Influence of pressure and temperature on SF_6 insulation performance [J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 71-77.

[4] 李伟,张晓星,傅明利,等. 环保绝缘气体 C_4F_7N 研究及应用进展 I: 绝缘及电、热分解特性[J]. 电工技术学报,2021,36(17):3535-3552.
LI Yi, ZHANG Xiaoxing, FU Mingli, et al. Research and application progress of eco-friendly gas insulating medium C_4F_7N , part I: insulation and electrical, thermal decomposition properties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3535-3552.

[5] 吴小钊,李俊豪,付鲁军,等. C_4F_7N/CO_2 环保混合气体在去离子栅式负荷开关中的开断特性[J]. 高压电器,2021,57(3):48-53.
WU Xiaozhao, LI Junhao, FU Lujun, et al. Breaking characteristics of eco-friendly C_4F_7N/CO_2 gas mixture in splitter arc extinction type load switch [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(3): 48-53.

[6] 宋宇,林莘,徐建源,等. 高压断路器中 C_4F_7N/CO_2 混合气体的开断性能[J]. 高电压技术,2023,49(3):971-981.
SONG Yu, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Interruption performan-

ce of C_4F_7N/CO_2 gas in high-voltage circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 971-981.

[7] 张咪,高克利,侯华,等. SF_6 替代绝缘气体的虚拟筛选与分子设计综述[J]. 高电压技术,2023,49(7):2816-2830.
ZHANG Mi, GAO Keli, HOU Hua, et al. Review on computational screening and molecular design of replacement gases for SF_6 [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2816-2830.

[8] 赵启. 环保高压开关技术和设备研究现状及展望[J]. 高压电器,2022,58(10):16-24.
ZHAO Qi. Research status and prospect of environmental protection high voltage switchgear technology and equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 16-24.

[9] YANG Y, GAO K L, DING L J, et al. Review of the decomposition characteristics of eco-friendly insulation gas [J]. High Voltage, 2021, 6(5): 733-749.

[10] 张佳,林莘,徐建源,等. 高压断路器分合闸过程触头间隙 C_4F_7N/CO_2 混合气体动态绝缘特性实验研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(22):7871-7881.
ZHANG Jia, LIN Xin, XU Jianyuan, et al. Experimental study on dynamic insulation properties of C_4F_7N/CO_2 gas mixtures in contact gap of high voltage circuit breaker during closing and opening process [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7871-7881.

[11] 熊嘉宇,张博雅,李兴文,等. SF_6 替代气体电子群参数的脉冲汤逊法测量研究[J]. 中国电机工程学报,2021,41(2):759-770.
XIONG Jiayu, ZHANG Boya, LI Xingwen, et al. Study on measurements of swarm parameters in SF_6 alternative gases by pulsed townsend method [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 759-770.

[12] 杨圆,高克利,丁立健,等. 微水对环保型 C_4F_7N/CO_2 混合气体绝缘和分解特性的影响规律[J]. 电网技术,2022,46(6):2402-2410.
YANG Yuan, GAO Keli, DING Lijian, et al. Influence law of micro-water on insulation and decomposition characteristics of eco-friendly C_4F_7N/CO_2 gas mixture [J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2402-2410.

[13] 杨韬,张博雅,李兴文,等. 不同故障工况下 C_4F_7N/CO_2 混合气体分解产物的实验研究[J]. 高电压技术,2021,47(12):4216-4228.
YANG Tao, ZHANG Boya, LI Xingwen, et al. Experimental study of decomposition products of C_4F_7N/CO_2 mixture under different fault conditions [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4216-4228.

[14] 邓云坤,彭晶,焦琳,等. $C_4F_7N-CO_2$ 混合气体绝缘性能计算分析[J]. 高压电器,2022,58(3):101-106.
DENG Yunkun, PENG Jing, JIAO Lin, et al. Calculation and analysis of the insulation performance of $C_4F_7N-CO_2$ gas mixtures [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 101-106.

[15] 张博雅,李兴文,唐念,等. 新型环保绝缘气体研发回顾与展望[J]. 高压电器,2022,58(4):1-7.
ZHANG Boya, LI Xingwen, TANG Nian, et al. Review and out-

- looks on development of new environmentally friendly insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4): 1-7.
- [16] 邓军波,董俊豪,陈俊涛,等. SF_6 替代气体界面绝缘特性的研究进展[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 661-673.
DENG Junbo, DONG Junhao, CHEN Junhao, et al. Research advances in interface insulation characteristics of SF_6 alternative gases[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 661-673.
- [17] 胡世卓,周文俊,郑宇,等. 3种缓冲气体对 C_4F_7N 混合气体绝缘特性的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 224-232.
HU Shizhuo, ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, et al. Influence of three buffer gases on dielectric strength of C_4F_7N mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 224-232.
- [18] 胡世卓,周文俊,郑宇,等. C_4F_7N/CO_2 和 C_4F_7N/N_2 混合气体工频击穿实验与协同效应分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3562-3570.
HU Shizhuo, ZHOU Wenjun, ZHENG Yu, et al. Power frequency breakdown experiments and synergistic effect analysis of C_4F_7N/CO_2 and C_4F_7N/N_2 mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3562-3570.
- [19] 张立松,叶明天,庞磊,等. C_4F_7N 混合气体电弧等离子体热力学参数计算[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 362-368.
ZHANG Lisong, YE Mingtian, PANG Lei, et al. Calculation of thermodynamic properties of C_4F_7N mixtures arc plasma[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 362-368.
- [20] 唐念,郭泽,张博雅,等. 气吹作用对 CO_2 、 CO_2/C_4 -PFN、 CO_2/C_5 -PFK 混合气体燃弧特性的影响[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 338-345.
TANG Nian, GUO Ze, ZHANG Boya, et al. Effects of air-blowing on the arcing characteristics of CO_2 and CO_2/C_4 -PFN, CO_2/C_5 -PFK mixtures[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 338-345.
- [21] OWENS J G. Greenhouse gas emission reductions through use of a sustainable alternative to SF_6 [C]//2016 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Montreal, QC, Canada. IEEE, 2016: 535-538.
- [22] 张博雅,周然,郝迈,等. C_4F_7N 混合气体在 40.5 kV 断路器中的应用研究(一):燃弧特性仿真与灭弧性能评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8750-8762.
ZHANG Boya, ZHOU Ran, HAO Mai, et al. Research on application of C_4F_7N gas mixture in 40.5 kV circuit breaker (part I): simulation and evaluation of arc extinguishing performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8750-8762.
- [23] 朱金华,谢成,邵先军,等. C_4F_7N 环保气体性能分析及其在环网柜中的应用展望[J]. 浙江电力, 2022, 41(1): 1-9.
ZHU Jinhua, XIE Cheng, SHAO Xianjun, et al. Analysis on the performance of C_4F_7N environmental gas and its application prospect in ring main units[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1): 1-9.
- [24] 孔佳琦,夏志坚,王巨丰,等. 35 kV 输电线路灭弧间隙的仿真分析与试验[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 202-210.
KONG Jiaqi, XIA Zhijian, WANG Jufeng, et al. Simulation analysis and experimental research on arc-extinguishing gap of 35 kV transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 202-210.
- [25] HABIBI M. Study of shock wave and magnetic pressure effects on the rail gap switch surface used at the APF plasma focus device[J]. Journal of Fusion Energy, 2011, 30(2): 133-136.
- [26] 刘毅,赵勇,任益佳,等. 水中大电流脉冲放电电弧通道发展过程分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(16): 3525-3534.
LIU Yi, ZHAO Yong, REN Yijia, et al. Analysis on the development process of arc channel for underwater high current pulsed discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(16): 3525-3534.
- [27] LIU S W, LIU Y, REN Y J, et al. Characteristic analysis of plasma channel and shock wave in electrohydraulic pulsed discharge[J]. Physics of Plasmas, 2019, 26(9): 093509.
- [28] 郭景润,戴宏宇,李黎. 燃弧气氛对强流脉冲电弧冲击波超压峰值的影响[J]. 南昌大学学报(理科版), 2022, 46(2): 130-135.
GUO Jingrun, DAI Hongyu, LI Li. Influence of arcing atmosphere on shock wave overpressure peak of high current pulsed arc[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2022, 46(2): 130-135.
- [29] 宫鑫,沈昊,戴宏宇,等. 强流脉冲电弧的冲击波超压峰值及其影响因素[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4412-4419.
GONG Xin, SHEN Hao, DAI Hongyu, et al. Peak value of shock wave overpressure and influencing factors of high-current pulse arc[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4412-4419.
- [30] 气体放电等离子基础数据库 [DB/OL]. [2020-06-20]. <http://plasma-data.net/index>.
Gas discharge plasma database (GPLAS) [DB/OL]. [2020-06-20]. <http://plasma-data.net/index>.
- [31] 宋冬冬,程林,林志法,等. 电弧热等离子体建模、仿真及应用综述[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 932-943.
SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of arc thermal plasma modeling, simulation and application[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 932-943.
- [32] 仲林林,王逸凡,顾琦. C_4F_7N 气体电弧的辐射输运特性研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5316-5329.
ZHONG Linlin, WANG Yifan, GU Qi. Study on radiation transport characteristics of C_4F_7N gaseous arc[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5316-5329.

作者简介:



吴东

吴东(1989),男,博士,副教授,研究方向为过电压与接地(E-mail: 274573302@qq.com);

陈文贵(1998),男,硕士在读,研究方向为过电压与接地。

Simulation analysis of arc extinguishing performance of C_4F_7N/CO_2 gas with under impulse arc

WU Dong, CHEN Wengui

(Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology (Guilin University of Technology),
Education Department of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Guilin 541006, China)

Abstract: Currently, the C_4F_7N/CO_2 hybrid gas is regarded as one of the most promising SF_6 substitutes. In order to explore the arc quenching capabilities of the C_4F_7N/CO_2 gas mixture, a set of arc energy balance equations is developed in accordance with the arc energy balance theory to determine the change law of overpressure within the arc-quenching pipe with time. In the paper, COMSOL Multiphysics software is used to establish a two-dimensional magneto-hydrodynamic model of the arc quenching structure of the pressure-explosive gas flow lightning gap, and the arc quenching characteristics of the different ratios of C_4F_7N/CO_2 gas mixtures in the pipeline are simulated and analyzed in the condition that the amplitude of the lightning current is 4 kA under the action of the impulse arc. Based on the above method, the change laws of conductivity, velocity and pressure are analyzed in the model by combining the arc energy balance theory. When compared to the theoretical results, it can be shown that 20% $C_4F_7N/80\%CO_2$ extinguishes arcs more effectively than 10% $C_4F_7N/90\%CO_2$ or 5% $C_4F_7N/95\%CO_2$ does, while the arc quenching time is in line with the specifications for air blowing to extinguish arcs.

Keywords: C_4F_7N/CO_2 hybrid gas; arc quenching capabilities; arc energy balance theory; magneto-hydrodynamic model; impulse arc; arc quenching time

(编辑 方晶)

(上接第 162 页)

Primary frequency regulation control strategy for electric vehicle aggregation based on charging and discharging margin

WU Shengjun¹, CAO Lu², CHEN Hao², DING Haoyin², JIA Yongyong¹, ZHU Xinyao¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China)

Abstract: Aiming at the problem of insufficient primary frequency regulation resources of power grid in the future, an adaptive control strategy based on charging and discharging margin is proposed for virtual energy storage of electric vehicle aggregation to participate in primary frequency regulation of power grid. Firstly, regulatory and operating range of the electric vehicle is analyzed. Secondly, the primary frequency regulation method of electric vehicle aggregation participating in the power grid is studied. Considering the margin of charging and discharging time and state of charge (SOC), charging and discharging margin index of electric vehicles is designed. Then, an adaptive primary frequency regulation control strategy based on charging and discharging margin is proposed to optimize the droop power of electric vehicles participating in primary frequency regulation, which considers both requirements of primary frequency regulation of power grid and charging, discharging of electric vehicles. Then, the primary frequency regulation capability of virtual energy storage in electric vehicle aggregation is evaluated by regular update, and the evaluation index of primary frequency regulation effect is proposed. Finally, through the simulation analysis of regional power grid cases, the effectiveness of the proposed strategy in reducing the system frequency deviation and optimizing the primary frequency regulation output of electric vehicles is verified.

Keywords: electric vehicle aggregation; virtual energy storage; primary frequency regulation; droop control; adaptive control; charging plans

(编辑 吴昊)